

УДК.621.129.12

**В. Авер'янов, канд. техн. наук**

*Дніпродзержинський державний технічний університет*

## **НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ**

**Резюме.** Проведено аналіз методів неруйнівного контролю, що забезпечують ефективне оцінювання технічного стану підшипників кочення під час їх експлуатації. Детально розглянуто сучасні методи ультразвукового оцінювання технічного стану підшипників кочення: Пік-чинника, прямого спектра, спектра огинаючих і ударних імпульсів.

**Ключові слова:** діагностування, підшипники, ультразвуковий метод, неруйнівний контроль.

**V. Averyanov**

## **UNDESTROYING CONTROL AND DIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS**

**Summary.** Rolling bearings are the most widespread and the most vulnerable element of any mechanism. They carry out the spatial fixing of the revolved details and are subject to main static and dynamic efforts arising in a mechanism. Therefore the technical condition of bearings is a major constituent determining the capacity of mechanism on the whole.

To prolong the operating life and reliability of equipment, decrease of the expenses for maintenance and idle time, the system of the exact diagnosing of current technical condition of rolling bearings is needed. Because of that the methods of control and diagnostics, being based on measuring of parameters of vibration have become vary popular. It is caused by the fact, that vibration signals carry in themselves information about the state of mechanism, bearings in particular. A theory and practice of analysis of vibration signal is so well studied, that it is possible to obtain reliable information about current technical condition of not only a bearing, but its elements as well.

The practical tasks of diagnostics of rolling bearings in the process of their operation deal, as a rule, with one of three basic methods. The algorithms of discovery the defects of temperature growth of the bearing unit are used in the first, in the second – appearance the products of wear in lubrication and in the third – the change of properties of vibration (noise). The most complete and detailed diagnostics of bearings with the discovery and identification of defects at the early stage of their development is executed on the signal of bearing vibration, mainly, high-frequency. Rolling bearing is the source of forces of two basic kinds – kinematics and forces of friction. Sometimes the third type of forces appears – shock type.

The analysis of methods of undestroying control which provide efficient estimation of the technical condition of rolling bearings during their operation have been carried out in the article. The modern methods of ultrasonic estimation of the technical condition of rolling bearings are considered in details: Peak-factor, direct spectrum, spectrum of rounding and shock impulses.

**Key words:** diagnostics, bearings, ultrasonic method, undestroying control.

**Постановка проблеми.** Підшипники в процесі експлуатації, як і інші деталі механізмів, зношуються, внаслідок чого виникають різні дефекти: зношування контактних поверхонь, втомні руйнування, тріщини, поверхневе спрацювання металу і т.д. Більшість несправностей можна виявити або попередити їх виникнення і розвиток за допомогою засобів діагностики. Діагностування або неруйнівний контроль – це комплекс заходів, направлений на виявлення прихованих, зовнішніх або внутрішніх дефектів у виробі, виробничого або експлуатаційного характеру (тріщини, пори і т.д.).

Для підвищення ресурсу і надійності устаткування, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідна система точної діагностики технічного стану підшипників кочення. У зв'язку з цим широке поширення в усьому світі набули методи неруйнівного контролю, що базуються на вимірюванні експлуатаційних параметрів. Теорія і практика аналізу параметрів настільки відпрацьована, що можна отримувати достовірну інформацію про поточний технічний стан не тільки підшипника, але й його елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У багатьох роботах розглядаються основні принципи діагностування підшипників – А.Г. Горбунова, В.А. Мартиновського, А.В. Бутана, М.А. Шипуліна [1–3].

**Метою роботи** є аналіз методів неруйнівного контролю, що забезпечують ефективне оцінювання технічного стану підшипників кочення під час їх експлуатації.

**Результати дослідження.** Неруйнівний контроль підшипників може проводитися трьома методами дефектоскопії [5]:

- магнітно-порошковий;
- вихорострумний;
- акустичний.

Магнітно-порошковий метод неруйнівного контролю є високоточним. Він дозволяє виявляти як поверхневі, так і підповерхневі тріщини в підшипниках [6]. Суть його полягає в наступному. Деталь необхідно намагнітити, потім нанести магнітний індикатор (порошок або суспензію). Якщо в деталі є дефект, то в цьому місці спостерігатиметься скупчення порошку. Тобто тріщину можна побачити очима і з 99% вірогідністю можна судити про її місцеположення і довжину. Розкриття тріщин, що виявляються даним методом, починається з 2 мкм. При використанні цього методу є багато нюансів – шорсткість поверхні, метод намагнічування і т.д. Але якщо всі операції виконуються правильно, то в достовірності контролю сумніватися не доводиться. Для проведення неруйнівного контролю підшипників існують спеціалізовані установки.

До плюсів магнітно-порошкового методу можна віднести:

- високу достовірність контролю;
- наочність результатів контролю.

До мінусів:

- діагностика повинна проводитися в добре освітленому приміщенні;
- контролюються деталі тільки з феромагнітних матеріалів;
- установки для магнітної діагностики стаціонарні.

Вихорострумний метод контролю заснований на збудженні в контрольованому виробі вихрових струмів і подальшому виділенні на виході перетворювача сигналу, амплітуда і фаза якого визначаються діючим вторинним полем [7]. Цей метод контролю дуже розвинений в авіації, тому що більшість деталей складається з немагнітних матеріалів (наприклад, алюміній). Вихорострумні дефектоскопи компактні, мають малу вагу, що дозволяє використовувати їх де завгодно. Можна проводити неруйнівний контроль навіть в погано освітленому приміщенні, оскільки за наявності дефекту спрацює світловий і звуковий індикатори. Діагностика може проводитися й автоматизованими установками, але, на жаль, ці установки мають вузьку спрямованість на якість певного типу підшипників.

До плюсів цього методу можна віднести:

- простоту операцій контролю;

- діагностику можна проводити на забруднених або покритих фарбою поверхнях;
- можна проводити контроль деталей з магнітного і немагнітного матеріалу.

До мінусів:

- виявляються тільки поверхневі тріщини.

Акустичний метод неруйнівного контролю заснований на використанні хвиль і пружних коливань. Інформативні параметри – час, частота, амплітуда, фаза, спектр. За акустичним методом частіше застосовують звукові й ультразвукові частоти. Тобто використовують діапазон частот приблизно від 0,5 кГц до 30 МГц. У разі, коли при контролі використовують частоти понад 20 кГц, допустиме вживання терміну «ультразвуковий» замість терміну «акустичний».

Плюси ультразвукового методу контролю:

- можливість виявлення як поверхневих, так і внутрішніх дефектів;
- можливість виявлення тонких тріщин;
- безпека для обслуговуючого персоналу.

До мінусів:

- складна форма та малі розміри деталей;
- шорсткість поверхні виробу.

У даний час в практиці використовуються чотири методи ультразвукового оцінювання технічного стану підшипників кочення: Пік-чинника, прямого спектра, спектра огинаючих і ударних імпульсів.

**Метод Пік-чинника.** Для контролю технічного стану підшипників даним методом необхідно мати звичний віброметр, що дозволяє вимірювати два параметри вібросигналу: середньоквадратичне значення (СКЗ) рівня вібрації, тобто енергію вібрації; пікову амплітуду (ПІК) вібрації (позитивну, негативну або повний розмах – значення не має). Відношення двох цих параметрів ПІК/СКЗ називається Пік-чинником.

У осцилограмі нового добре змащеного підшипника присутній стаціонарний сигнал шумового характеру (рис.1а). З часом, у міру утворення дефектів на деталях підшипника, в сигналі почнуть з'являтися окремі короткі амплітудні списи, відповідні моментам зіткнення дефектів (рис.1б). Надалі з розвитком дефекту спочатку зростає амплітуда піків, потім поступово збільшується і їх кількість (рис.1в). Наприклад дефект, що з'явився на одній з кульок, створює згодом вибоїну на кільці, яка переноситься на іншу кульку; дефекти кульок починають спрацьовувати сепаратор і т.д. до повного руйнування.

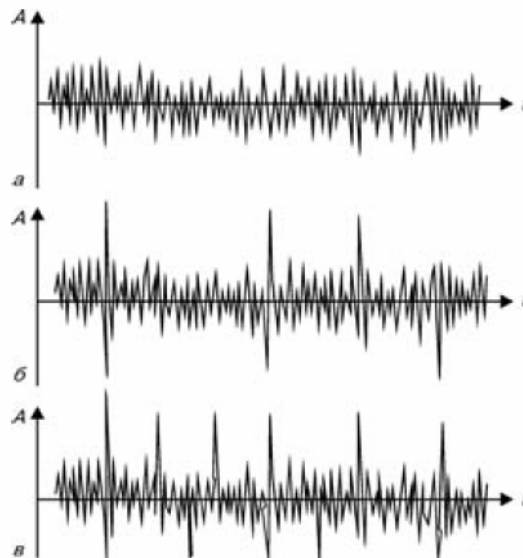


Рисунок 1. Характеристика вібросигналів при роботі підшипника, отриманих методом ПІК-фактора

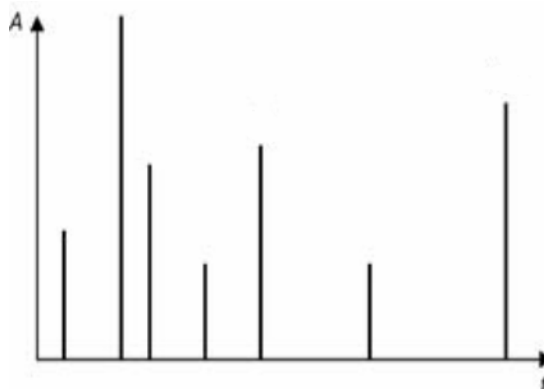
Figure 1. Description of vibrosignals during bearing operation obtained by the Peak-factor method

Спочатку, у міру появи і розвитку дефекту, зростає функція ПІК, а СКЗ змінюється дуже мало, оскільки окремі дуже короткі амплітудні списи практично не приводять до зміни енергетичних характеристик сигналу. Надалі, у міру збільшення амплітуд і кількості піків, починає збільшуватися енергія сигналу, зростає СКЗ вібрації. Відношення ПІК/СКЗ через тимчасовий зсув між ними має явно виражений максимум на тимчасовій осі. На цьому і ґрунтується метод Пік-чинника.

Плюсом цього методу є його простота (для реалізації потрібен звичний віброметр загального рівня).

Недоліки методу – слабка перешкодозахисна здатність і необхідність проведення багатократних вимірювань у процесі експлуатації. Встановити датчик безпосередньо на зовнішній обіймі підшипника практично неможливо, тому сигнал вібрації характеризує не тільки підшипник, але й інші вузли механізму, що в даному випадку розглядаються як перешкоди. Чим далі встановлений датчик від підшипника і складніше кінематика самого механізму, тим менша достовірність методу. Крім того, отримати оцінку стану по одному виміру неможливо.

**Метод прямого спектра.** Для контролю технічного стану підшипників за даним методом необхідний аналізатор спектра вібрації (віброаналізатор). Метод базується на аналізі спектра вібрації – виявленні періодичності (частоти) появи амплітудних сплесків. Вібраційний сигнал аналізується вузькосмуговим віброаналізатором, і за частотним складом спектра (рис.2) можна виявити виникнення і розвиток дефектів підшипника.



**Рисунок 2.** Частотний аналіз, отриманий методом прямого спектра при аналізі дефектів підшипника

**Figure 2.** Frequency analysis obtained by the method of direct spectrum at the analysis of defects of a bearing

Кожному дефекту на елементах підшипника (тілах кочення, внутрішньому і зовнішньому кільця, сепараторі) відповідають свої частоти, які залежать від кінематики підшипника і швидкості його обертання. Наявність тієї або іншої частотної складової в спектрі сигналу свідчить про виникнення відповідного дефекту, а амплітуда цієї складової – про глибину дефекту.

До плюсів методу слід віднести: високу перешкодозахисну (маловірогідна наявність у механізмі джерел, що створюють вібрації на тих же частотах, що й дефекти підшипника); високу інформативність методу; можливість оцінювання стану елементів підшипника, оскільки вони генерують різні частотні ряди в спектрі.

Недоліки методу: висока вартість, якщо використовувати віброаналізатор тільки для контролю підшипників; мала чутливість до дефектів, що зароджуються, і слабким, у зв'язку з тим, що в більшості випадків підшипники є малопотужними джерелами вібрації. Невелике викришення на кульці або доріжці не в змозі помітно гойднути механізм так, щоб можна

було побачити частотну складову в спектрі. І лише при достатньо сильних дефектах амплітуди ці частотні складові починають помітно виділятися в спектрі.

Цей метод використовується досить широко, особливо професіоналами, і дає добрі результати.

**Метод огинаючого спектра.** Для контролю технічного стану підшипників за даним методом необхідний аналізатор спектра вібрації з функцією аналізу спектра огинаючої високочастотної вібрації. Метод базується на аналізі високочастотної складової вібрації й виявленні модулюючих її низькочастотних сигналів.

На рис.1 бачимо, що високочастотна частина сигналу змінює свою амплітуду в часі, тобто вона модулюється якимось більш низькочастотним сигналом. Виділення й опрацювання цієї інформації й складають основу методу. Розглянемо підшипник з дефектом (зкол, тріщина і т. д.), що зароджується, на зовнішній обоймі. При ударі тіл кочення об дефект виникають високочастотні затухаючі коливання, які повторюються (модулюються) з частотою, дорівнює частоті перекошування тіл кочення по зовнішньому кільцю. Саме в цьому модулюючому сигналі міститься інформація про стан підшипника.

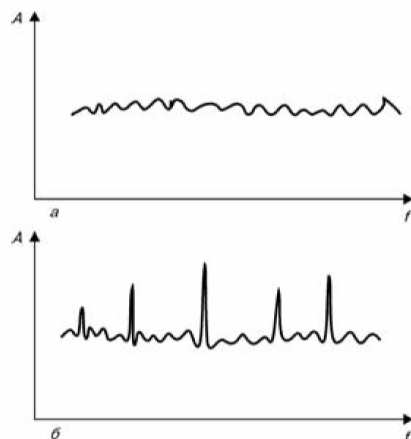
Встановлено, що якнайкращі результати досягаються в тому випадку, якщо аналізувати модуляцію не широкосмугового сигналу, отриманого від акселерометра, а заздалегідь здійснити вузькополосну фільтрацію сигналу, вибрати основну (несучу) частоту в діапазоні від 4 до 32 кГц й аналізувати модуляцію цього сигналу. Для цього відфільтрований сигнал детектує, тобто виділяється модулюючий сигнал (його ще називають огинаючим), який подається на вузькосмуговий віброаналізатор. В результаті отримуємо спектр модулюючого сигналу, що цікавить нас, або огинаючий спектр, що і дало назву методу.

Опрацювання сигналу дуже складне, але результат того вартий. Річ у тому, що невеликі дефекти підшипника не в змозі викликати помітної вібрації в області низьких і середніх частот. Водночас для модуляції високочастотних вібраційних шумів енергії виникаючих ударів виявляється цілком достатньо. Таким чином, метод володіє дуже високою чутливістю. За відсутності дефектів огинаючий спектр є майже горизонтальною хвилястою лінією (рис.3а). При появі дефектів над рівнем лінії суцільного фону починають підноситися дискретні складові, частоти яких однозначно прораховуються по кінематиці й обертах підшипника (рис.3б). Частотний склад огинаючого спектру дозволяє виявити наявність дефектів, а перевищення відповідних складових над фоном однозначно характеризує глибину кожного дефекту.

Плюсами цього методу є висока чутливість, інформативність і перешкодозахисна здатність, недоліком – висока вартість обладнання.

Описаний метод дуже широко використовується професіоналами в стаціонарних системах контролю технічного стану устаткування.

**Метод ударних імпульсів.** Він заснований на вимірюванні й реєстрації механічних ударних хвиль, викликаних зіткненням двох тіл. Прискорення частинок матеріалу в точці удару викликає хвилю стиснення, яка розподіляється у вигляді ультразвукових коливань. Прискорення частинок матеріалу в початковій фазі удару залежить тільки від швидкості зіткнення й не залежить від співвідношення розмірів тіл. Період часу малий, і помітної деформації не відбувається. Величина фронту хвилі є мірою швидкості зіткнення (удару) двох тіл. У другій фазі удару поверхні двох тіл деформуються, енергія руху відхиляє тіло й викликає в ньому коливання.



**Рисунок 3.** Огибающий спектр при відсутності (а) та появі (б) дефектів у підшипнику

**Figure 3.** Rounding spectrum without defects (a) and with their appearance (б) in bearing

Для вимірювання ударних імпульсів використовується п'єзоелектричний датчик, на який не впливають фон вібрації і шум. Викликана механічним ударом фронтальна хвиля стиснення порушує в ньому затухаючі коливання (рис.4). Пікове значення амплітуди цього затухаючого коливання прямо пропорційна швидкості удару. Оскільки затухаючий перехідний процес дуже добре визначається і має постійну величину загасання, то його можна відфільтрувати від інших сигналів, тобто від сигналів вібрації. Вимірювання й аналіз затухаючого перехідного процесу – основа методу ударних імпульсів. Результати вимірювань дуже легко нормувати за швидкістю зіткнення, знаючи геометрію підшипника і його оберти. Амплітуди ударних імпульсів однозначно пов'язані зі швидкістю зіткнення й глибиною дефектів. Тому за амплітудами ударних імпульсів можна достовірно діагностувати наявність дефектів і їх глибину.



**Рисунок 4.** Осцилограма підшипника при його діагностуванні методом ударних імпульсів

**Figure 4.** Ostsilogram of a bearing under its diagnostics by the method of shock impulses

До плюсів цього методу відносяться висока чутливість, інформативність і перешкодозахисна здатність. Він досить простий і дешевий в реалізації – існують прості портативні прилади. Проте існує одне обмеження, пов'язане з конструктивним виконанням механізму. Оскільки йдеться про вимірювання ультразвукових хвиль коливань, які дуже сильно затухають на межах роз'ємних з'єднань, то для точності вимірювань необхідно, щоб між зовнішнім кільцем підшипника і місцем установки датчика існував суцільний масив металу.

Метод широко використовується професіоналами, простий і доступний в обслуговуванні.

**Технічні засоби для діагностики підшипників кочення за вібрацією.** Діагностика технічного стану за вібрацією широко й дуже ефективно використовується на практиці.

Системи діагностики дозволяють оцінювати технічний стан не тільки підшипників кочення, основні методи діагностики яких були розглянуті вище, але і такі вузли, як підшипники ковзання, ротори, механічні передачі, у тому числі зубчасті й пасові, машини постійного струму, синхронні машини, асинхронні двигуни, насосні агрегати, компресори, турбіни й т. д.

Структура найпростішої переносної системи автоматичної діагностики зображена на рис.5. Для вузлів або деталей, частота обертання яких у момент вимірювання вібрації точно невідома, використовується, окрім датчика вібрації, ще і датчик обертів.



1 – приймач даних – аналізатор; 2 – персональний комп'ютер;  
3 – кабель для забезпечення зв'язку між аналізатором і комп'ютером; 4 – датчик вібрації

**Рисунок 5.** Найпростіша переносна система діагностики

**Figure 5.** Simplest portable system of diagnostics

**Висновки.** Ультразвуковий метод неруйнівного контролю є ефективним методом діагностики підшипників кочення, що уможливорює:

- 1) виявляти дефекти зборки;
- 2) виявляти як поверхневі, так і внутрішні дефекти;
- 3) виявляти, оцінювати рівень дефектів експлуатації й прогнозувати їх розвиток, причому на початковій стадії;
- 4) безпеку для обслуговуючого персоналу.

Такі дослідження раціонально проводити із використанням комп'ютерних програм автоматичної діагностики.

**Conclusions.** The ultrasonic method of undestroying control is the effective method of diagnostics of rolling bearings, that allows:

- 1) to identify the defects of assembly;
- 2) to identify surface and internal defects;
- 3) to identify, to estimate the level of defects operation and to predict their development at the initial stage of their development;
- 4) safety for maintenance staff.

Such researches are worthy being carried out taking advantage of computer software of automatic diagnostics.

#### Список використаної літератури

1. Мартыновский, В.А. Использование спектра огибающей высокочастотной вибрации для диагностики подшипников качения [Текст] / В.А. Мартыновский // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – №3. – С.17–22.
2. Горбунов, А.Г. Диагностика технического состояния подшипниковых узлов [Текст] / А.Г. Горбунов // Труды ВНИИЭМ. – 2000. – №2. – С.54–60.

3. Шипулин, М.А. Восстановление полимер-полимерной композицией и неразрушающий контроль подшипников качения сельскохозяйственной техники [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Бутан, М.А. Шипулин // Вестник МичГАУ. – 2010. – №1. – С.181–185.
4. Коварский, Е.М. Ударно-импульсный метод диагностики начального разрушения подшипников качения [Текст] / Е.М. Коварский, В.М. Малыгин, А.Г. Горбунов // Электроника. – 1991. – №1. – С.57–59.
5. Савицкий, С.С. Методы и средства неразрушающего контроля [Текст] / С.С. Савицкий. – Минск: БНТУ, 2012. – 183 с.
6. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Текст] / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: АО ВАСТ, 2007. – 125 с.
7. Азовцев, А.Ю. Новое поколение систем диагностики и прогнозирования технического состояния [Текст] / А.Ю. Азовцев, А.В. Барков. – СПб.: АО ВАСТ, 2004. – 208 с.

*Отримано 15.12.2014*